

面状工法による重力式コンクリートダム の温度規制に関する解析的考察

山住有巧*・播田一雄**・自閑茂治***・谷 剛****

面状工法で施工されるコンクリートダムの温度規制に関して、従来より採用されてきた柱状工法との違いを明確にしつつ、特徴的事項を整理した上で、温度応力の長期問題についてモデルダムを用いての解析的検討を加えた結果、相対打上がり速度という概念を導入することによって、ダム堤体の最適な打上がり速度についての新しい知見を得た。

Key Words: plane placed concrete method, thermal stress, Restraint Matrix Method, relative placing speed

1. はじめに

重力式コンクリートダムを建設する場合には、大量のコンクリートを比較的連続性を持って打設することになる。打設されたコンクリートは、硬化に際してセメントの水和作用により熱を発生する。ダムコンクリートはマスコンクリートであることから、蓄積される熱量が多くなり、それに伴う体積の変化が種々の拘束を受けると、温度応力と呼ばれる拘束力が発生し、これがダム堤体内のクラック発生を促進させる恐れがある。このような温度応力によるクラックがダム堤体内に発生すると、ダムの一体性が失われ、ひいては安定性・止水性等のダムの機能を損なうことになるため、重力式コンクリートダムにおける温度規制は、ダムの設計・施工の両面から、重要課題の一つとして数多く議論されてきた。

重力式コンクリートダム（以下、コンクリートダムと略称する）の施工法には、従来より採用されてきた柱状工法と最近の我が国のコンクリートダム合理化施工法の研究の中で開発された面状工法（ここでは、堤体を平面状にかつ各ヤードの標高差を最小にして、施工中の堤体をコンクリートの運搬、打設に活用する工法と定義する）とがあるが、面状工法によるコンクリートダムの施工では、①堤体の立ち上がり形状が数ブロックの横継目を横断した打設区画を一度に打設すること、②打設後に横継目のみを設けて縦継目を設けないこと、③パイプクーリングを省略すること、などの特徴がある。

面状工法の温度規制では、柱状工法の温度規制に比べて基本的考え方が異なり、①コンクリートの配合面から

は単位結合材料の貧配合化、フライアッシュ等混和材の高混入化を行うこと、②コンクリートの打上がり速度、打設の連続性、打設開始時期、隣接する打設区画のリフト差の調整などコンクリート打設計画を管理すること、を有力な手法としている。

2. 研究の目的

コンクリートダムの温度規制については、温度変化が生じて温度応力によるクラックが発生しないように、堤体を大きさの制限されたいくつかのブロックに分割して打設する方法と、温度応力の発生要因となる温度変化を規制する方法とに使い分けている。

柱状工法^{9),10)}では、前者については我が国ではダム軸に直角に15m程度の等間隔で設けられる横継目と、ダム軸と平行に長くても60m程度以内の間隔で設けられる縦継目とで分割されたブロックを形成する。後者については、パイプクーリング等の人工冷却方法と、各ブロックの立ち上がり速度を伝統的に1日あたり30cm以内に制限する（例えば、1.5mリフト厚のリフトを打設間隔5日で打設すること）、いわゆる1day, 1footの打設条件による施工方法をとっている。

面状工法では、その施工特性からパイプクーリングによる人工冷却を実施しない。従って、堤体の縦継目による分割を行わないので、打設ブロックの平面形状は、施工中の堤体の上下流方向の長さ、ダム軸方向で30~45m程度以上の幅とに分割され、柱状工法の打設ブロックの数倍以上の面積のブロックを一度に打設する。

面状工法の温度規制では、打設ブロック形状とコンクリート配合設計を除くと、打設ブロックを隣接するブロックで覆う速度、即ち適切な堤体の立ち上がり速度が重要な意味を持つ。面状工法は、打設間隔の短縮を目指す工法であるので、打上がり速度が比較的速く規則的となり、結果的に堤体の打上がり工期が短縮されることに

* (財)ダム技術センター理事

** 水資源開発公団大山ダム建設所長

(元水資源開発公団第一工務部設計課長)

*** (財)ダム水源環境整備センター企画部

**** 正会員 (財)ダム水源環境整備センター調査第二部

(元水資源開発公団試験研究所構造解析研究室)

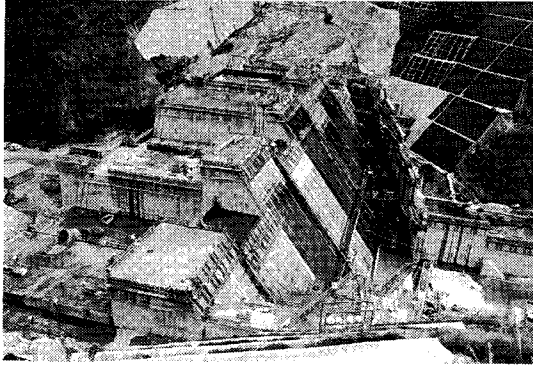


写真-1 柱状工法によるコンクリートダムの施工例

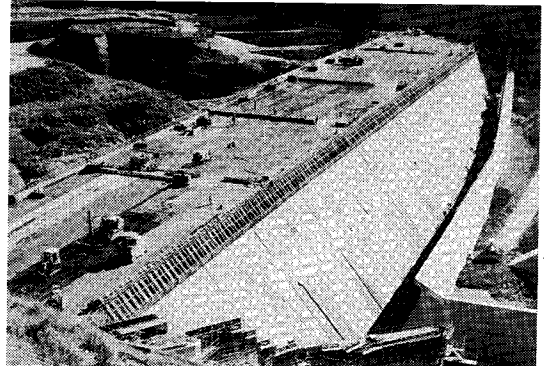


写真-2 面状工法によるコンクリートダムの施工例

なる。打上がり速度が速いほど、内部温度の上昇をもたらすことになるが、リフト厚が薄いことによる速やかな放熱や、施工上一定の打上がり速度と打設の連続性を確保することで、堤体内の緩やかな温度勾配が保たれ、結果的に柱状工法に比べて温度応力上の問題で有利になる面がある。写真-1, 2に柱状工法および面状工法によるコンクリートダムの施工の例を示す。

本論文ではこれらの傾向を定性的に把握するために、主に温度規制の長期間問題に関連して、コンクリートの温度変化に影響を与える主な要因である外気温、配合、打上がり速度（リフト厚、打設間隔）および打設開始時期を変化させた温度履歴計算を行い、算出された最終温度降下量分布から、ダム堤体内の最終的な温度応力分布を算定し、各種要因と温度応力との関係を明らかにするとともに、面状工法における打上がり速度の最適条件について考察する。また、面状工法のリフトスケジュールとコンクリート施工の基本サイクル（打設、養生、グリーンカット）との基本条件から決定される堤体の打上がり速度に関して、我が国の一般的気候条件と施工条件の際に採用されるべき堤体打上がり速度について述べる。

3. 面状工法における温度規制

(1) 面状工法における温度規制の特徴

面状工法は、ダムの立ち上がり形状が横継目を数ブロック横断して堤体を平面状に立ち上げ、その後横継目のみを設けて縦継目を設けないことが最大の特徴である。このような面状工法における温度規制上の特徴を、従来工法（ブロック工法やレーヤ工法）と比較して示すと、以下ようになる。

a) コンクリート配合上の特徴

面状工法では、コンクリート中における単位結合材量（セメント＋フライアッシュ）の貧配合化およびフライアッシュまたは高炉スラグ微粉末の高混入化により、セメント水和熱発生の低減を図り、コンクリートの最高上

昇温度を低下させることができ温度規制上有利になる。

b) 立ち上がり形状の特徴

面状工法では、立ち上がりのブロック割りが一般に横継目を3～4ブロック程度横断し、ダム軸を直交する施工継目間隔が45～60mとなる。したがって、面状工法では従来工法に比べて横継目の露出機会が低減し、横継目面の表面冷却による内部拘束の問題はほとんど発生しないと考えられる。

c) 施工方法の特徴

施工方法に関して、面状工法における温度規制の特徴は、その打設リフトの薄さおよび打設速度の速さ、打設の連続性、さらにはパイプクーリングの省略がある。

(2) 面状工法における温度規制計画

コンクリートダムの温度応力に関しては、以下に概略述べるように、a)短期問題、b)中期問題、c)長期間問題、d)上下流面問題に分けて検討されることが多い。

a) 短期問題

短期問題はリフト打設後、上位のリフトが打設されるまでの露出期間中のリフトの温度変化により生じる温度応力について検討を加えるもので、打設後の半日から数日間までがその検討対象時期となる。

短期問題の検討項目としては、以下があげられる。

- ①露出期間中のリフト内部の温度変化による温度応力
- ②露出期間中のリフト内部の温度勾配による温度応力

b) 中期問題

中期問題は、ダム堤体の立ち上がり途中に、降雪等による越冬ブロックの発生や放流管設置および洪水の越流等によって、ある程度長期にわたりコンクリート打設が休止されて放置ブロックが生じる場合、その間の放置ブロックの温度変化による温度応力の発生を検討するもので、休止期間中の数十日～数ヶ月程度が検討対象時期となる。

中期問題の検討項目としては、以下があげられる。

- ①放置ブロック内部の温度変化による温度応力

- ②放置ブロック内部の温度勾配による温度応力
- ③放置ブロック直上の打設再開リフトにおける温度応力
 - c) 長期問題⁹⁾

堤体内のダムコンクリートは、堤体完成後長期にわたる温度降下を続け、最終的には、外気温等の外部温度と平衡状態となる最終安定温度に至る。この際、堤体内部の最高上昇温度から最終安定温度に至るまでの最終温度降下量により、外部拘束による温度応力が発生することとなる。このような温度応力を検討の対象とするのが長期問題であり、ダム完成後の数年～数十年間までがその検討対象時期となる。長期問題の温度応力に対しては、コンクリートの最高上昇温度を抑えて最終温度降下量を小さくするために、打設温度の管理（プレクーリングの実施、暑中コンクリートの規制、夜間打設等）や打設間隔の管理（打設間隔の下限設定等）等の温度規制が採用される。さらに、大規模ダムにおける長期問題では、最終温度降下量のみでなく、堤体内の最終温度降下量分布も重要な要因となる。

d) 上下流面問題

ダム堤体の上下流面は、打設当初から露出されることから、外気温の変化に伴い表面付近に温度勾配を生じたり、堤体完成後徐々に堤体内部が温度降下し最終安定温度に至っても、季節変化を受ける外気温との温度差により、温度勾配が生じる。さらに、上下流面に配置した外部コンクリートおよび堤体内部の内部コンクリートの配合の違いからくるコンクリート温度上昇の差異により、温度勾配が生じる。これら上下流面に発生する温度応力に関する検討をここでは上下流面問題と呼ぶ。上下流面問題は、施工中から完成後までの短期から長期にわたる時期がその検討対象時期となるが、最も検討を要するのは、以下の時期であると考えられる。

- ①型枠脱型後の初期材令時
- ②打設後最初に迎える低温期

4. 解析的検討

一般に、マスコンクリートの温度応力に関する解析手法は、JCIのCompensation Line法が、ダム工学の分野では、簡便な解析法として従来より、永山らによる『拘束度を用いる方法』⁹⁾がある。本論文では、この解析手法を用いて以下の検討を行うこととする。応力を求める式を拘束度Rを用いて表すと次のようになる。

$$\sigma = R \cdot E_c \cdot \alpha \cdot \Delta T \dots\dots\dots(1)$$

ここに、R：拘束度 (0 ≤ R ≤ 1)、E_c：コンクリートの弾性係数 (kgf/cm²)、α：コンクリートの熱膨張率 (1/°C)、ΔT：コンクリートの温度降下量 (°C)である。この解析手法は、コンクリートの温度ひずみと発生温度応力との線型性を仮定し、コンクリートの体積変化の拘束の程度を表す係数として拘束度Rを導入するもので

ある。ここで、R=1はコンクリートの温度変化による体積変化が完全に拘束される場合を示すのに対し、R=0は拘束がなくコンクリートの自由変形が許される場合を示している。

この『拘束度を用いる方法』に関して、永山ら⁹⁾は、外部拘束（岩盤拘束）について理論的な考察を加え、外部拘束度の大きさは、コンクリートブロックの長さ(L)によって直接定まるのではなく、形状比、すなわちコンクリートブロックの長さ(H)と長さ(L)の比H/Lによって定まることを示した。

また、永山らはその後、さらに一般化させた『拘束度マトリクスを用いる方法』⁹⁾を提案している。この解析法は、2次元FEM逐次解析法と比較して、初期材令の圧縮応力を考慮しない手法であるので、結果として安全側の値が求められる。また、既設ダムでの実測値との比較でも妥当性が検証されている。

拘束度は次のようにマトリクス表示で表現できる。

$$\{\sigma\} = [R] \cdot E_c \cdot \alpha \cdot \{\Delta T\} \dots\dots\dots(2)$$

または、

$$\{\epsilon\} = [R] \cdot \alpha \cdot \{\Delta T\} \dots\dots\dots(3)$$

いま鉛直方向に十分高く積み上げたりフトを考え、そのある層（仮にj層）に単位温度変化をあたえた場合、他の層（i層）に生じる拘束温度ひずみをε_{ij}とすると式(3)は、

$$\begin{aligned} \{\epsilon_{ij}\} &= \alpha \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1n} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2n} \\ & & & \\ & & & \\ R_{n1} & R_{n2} & \dots & R_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta T_1 \\ \Delta T_2 \\ \\ \Delta T_n \end{pmatrix} \\ &= \alpha \cdot [R_{ij}] \cdot \{\Delta T_j\} \end{aligned}$$

と表され、この[R_{ij}]を一般化された拘束度、または拘束度マトリクスと呼ぶ。拘束度マトリクスを用いれば任意の不均一な温度降下分布{ΔT}に対する温度応力分布{σ}あるいは拘束温度ひずみ分布{ε}を求めることができる。

面状工法で施工するダムの場合、コンクリートが打設された後に特別な人工冷却が行われず、またコンクリートの打上がり速度が速いこともあって、大部分の温度降下は堤体コンクリートの打設完了後に生じると仮定して大きな問題はない（但し、長期間コンクリート打設が中断される場合を除く）。従って、面状工法によるダムに生じる温度応力は、完成したダムに対する拘束度マトリクス[R]を用いて求めることができる。

ここで、温度降下分布{ΔT}は、コンクリートダム堤体の場合、水平方向のリフト打設による季節的な温度の不均一性が問題になることから、ダム堤体鉛直方向の温度降下量ベクトルを考える。

以下の検討では、主に面状工法の温度規制計画のうち

表-1 解析条件 (基本ケース)

コンクリート	比熱 単位体積質量 熱伝導率 熱伝達率 単位セメント量(C+F) 断熱温度上昇式	220 kcal/t°C 2.4 t/m³ 40 kcal/mday °C 240 kcal/mday °C 130 kg/m³ $\phi = 15.0 \cdot [1 - \exp(-at^{0.6})]$ $a = 0.013 \phi_0 + 0.217$
	打設温度 (ϕ_0)	外気温と同一とするが冬期は5°C以上夏期は25°C以下
	最終安定温度	11.5°C
岩盤	熱特性 初期温度	非発熱性定数以外コンクリートと同一 10 °C
コンクリートと岩盤の弾性係数比		$E_c/E_r = 6$
外気温 (Ta)		Uダムでの過去7年間の平均値
打上がり速度 (V)		リフト厚 (t1) = 0.75 m 打設間隔 (D) = 6 day $V = t1/D = 12.5 \text{ cm/day}$
打設開始日		10月1日

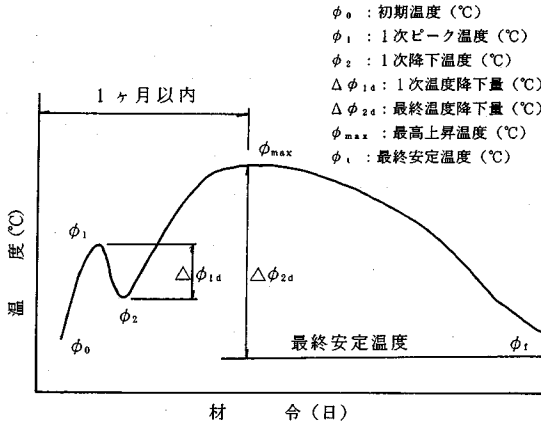


図-1 コンクリートの温度履歴

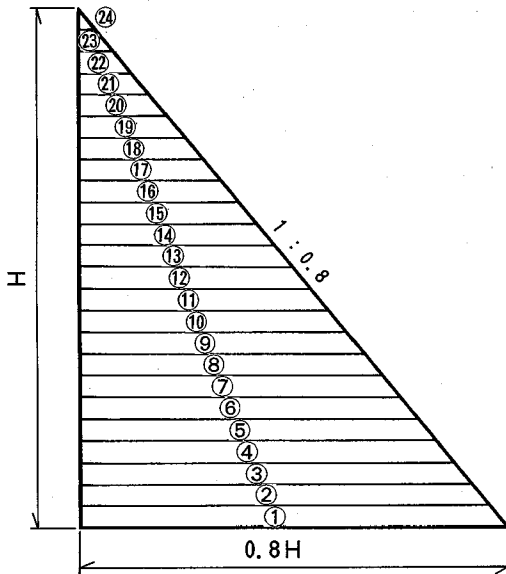


図-2 ダムモデル層分割図

表-2 温度履歴計算ケース

Case	パラメータ	条件
0	—	基本ケース
11	外気温	日平均気温 + (日平均気温 - 11.5) × 0.25
12	外気温	日平均気温 - 4°C
21	配合	$C + F = 120; T = 13.3 [1 - \exp(-at^{0.6})]$
22	配合	$C + F = 140; T = 16.7 [1 - \exp(-at^{0.6})]$
23	配合	$C + F = 180; T = 23.4 [1 - \exp(-at^{0.6})]$
31	リフト厚	$t1 = 0.50 \text{ m} (V = 8.33 \text{ cm/day})$
32	リフト厚	$t1 = 1.00 \text{ m} (V = 16.66 \text{ cm/day})$
33	リフト厚	$t1 = 1.25 \text{ m} (V = 20.83 \text{ cm/day})$
34	リフト厚	$t1 = 1.50 \text{ m} (V = 25.00 \text{ cm/day})$
41	打設間隔	15日間隔打設 ($V = 5.0 \text{ cm/day}$)
42	打設間隔	10日間隔打設 ($V = 7.5 \text{ cm/day}$)
43	打設間隔	5日間隔打設 ($V = 15.0 \text{ cm/day}$)
44	打設間隔	3日間隔打設 ($V = 25.0 \text{ cm/day}$)
45	打設間隔	2日間隔打設 ($V = 37.5 \text{ cm/day}$)
51	打設開始日	4月1日
52	打設開始日	7月1日
53	打設開始日	1月1日
61	リフト厚 打設間隔	$t1 = 0.50 \text{ m}; 2 \text{ 日間隔打設}$ ($V = 25 \text{ cm/day}$)
62	リフト厚 打設間隔	$t1 = 1.00 \text{ m}; 4 \text{ 日間隔打設}$ ($V = 25 \text{ cm/day}$)

の長期問題⁹⁾を対象として、モデルダムを用いてコンクリートの内部温度に影響を与えるパラメータ〔外気温、配合(単位セメント量)、打上がり速度(リフト厚、打設間隔)、打設開始日〕を変化させた温度履歴計算を行い、算定された最終温度降下量分布からダム堤体中に発生する拘束温度ひずみを求め、各パラメータと温度応力との関係を明らかにし、さらに面状工法における温度規制上の打上がり速度の最適条件について検討した結果を述べることとする。

コンクリートの温度応力に関する検討手法は、いくつかの解析手法が提案されているが、ここでは、まず温度履歴の計算は一次元の熱伝導有限要素法、拘束温度ひず

表-3 拘束度マトリクス ($E_c/E_R=6$)

温度変化を与える層番号 単 位: $\times 10^{-3}$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
1	843	-181	-166	-116	-73	-43	-21	-7	2	7	8	6	4	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2	-154	867	-139	-134	-101	-68	-41	-22	-9	-1	3	5	4	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
3	-152	-129	895	-120	-124	-85	-65	-40	-21	-9	-1	2	3	3	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	
4	-118	-127	-112	905	-115	-121	-95	-64	-38	-19	-6	0	3	3	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	
5	-74	-95	-114	-109	906	-111	-125	-104	-68	-38	-16	-3	3	4	4	2	1	1	0	0	0	0	0	0	
6	-54	-70	-91	-107	-100	906	-117	-130	-104	-64	-33	-12	-1	3	4	3	2	1	0	0	0	0	0	0	
7	-32	-45	-66	-91	-108	-102	921	-123	-133	-103	-59	-25	-7	1	3	3	2	1	0	0	0	0	0	0	
8	-13	-26	-43	-66	-94	-113	-108	897	-131	-137	-59	-51	-20	-4	1	3	2	1	1	0	0	0	0	0	
9	0	-11	-24	-43	-67	-96	-116	-115	883	-142	-140	-92	-41	-14	-2	1	2	1	1	0	0	0	0	0	
10	1	0	-10	-24	-42	-66	-95	-120	-124	864	-155	-139	-80	-32	-10	-2	1	1	1	0	0	0	0	0	
11	13	7	-1	-10	-22	-39	-63	-95	-124	-136	844	-170	-131	-66	-24	-8	-2	1	1	0	0	0	0	0	
12	14	9	5	-1	-9	-19	-35	-59	-93	-128	-152	815	-186	-114	-45	-17	-6	-1	1	0	0	0	0	0	
13	10	8	6	3	0	-8	-14	-27	-49	-81	-128	-165	809	-191	-123	-50	-16	-2	2	1	0	0	0	0	
14	7	6	5	4	2	0	-4	-11	-22	-42	-76	-129	-173	795	-199	-127	-46	-8	3	3	1	0	0	0	
15	4	3	3	3	2	1	0	-3	-8	-17	-34	-66	-125	-185	778	-211	-125	-35	1	6	2	0	0	0	
16	2	2	2	2	2	1	1	-1	-4	-10	-21	-47	-109	-202	740	-232	-125	-22	12	7	1	0	0	0	
17	1	1	1	1	1	2	2	2	2	1	0	-4	-15	-45	-115	-210	722	-244	-109	-4	11	2	0	0	
18	0	0	1	1	1	1	1	2	2	3	4	4	2	-8	-39	-114	-224	690	-237	-84	8	5	0	0	
19	0	0	0	0	0	1	1	1	2	3	4	6	8	7	0	-30	-108	-241	633	-251	-42	5	1	0	
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	3	5	6	5	-4	-74	-256	588	-264	-26	13	-1	
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	4	6	9	7	-56	-251	531	-259	11	4
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	5	11	19	-33	-290	520	-234	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	7	19	-272	478	-235	0	0	
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	5	97	-503	405	0

応力を求める層番号

みの計算は、前述したダム工学の分野で一般的な『拘束度マトリクスを用いる方法』で行った。

(1) 検討条件

a) 温度履歴の計算

温度履歴計算を行うにあたってまず、打設標準パターンを設定し、基本ケースの計算を行った。表-1に基本ケースの解析条件を示す。次に、解析条件のうちコンクリートの内部温度に影響を与えるパラメータをそれぞれ変化させるパラメータ解析を基本ケースの他、表-2に示すとおり、外気温2ケース、配合(単位セメント量)3ケース、打上がり速度11ケース(リフト厚4ケース、打設間隔5ケース、リフト厚+打設間隔2ケース)、打設開始日3ケースの合計19ケースを行った。

なお、解析手法にはリフトの積み上げ過程を考慮した1次元の熱伝導有限要素法を用いている。計算されたコンクリートリフトの温度履歴は、一般に図-1のように示されるが、ここでは図に示される最高上昇温度 ϕ_{max} と最終安定温度 ϕ_t の差である温度降下量 $\Delta\phi_{2t}$ を最終温度降下量として拘束度マトリクス法の入力条件として与えた。

b) 拘束温度ひずみの計算

拘束温度ひずみを求める計算に用いた拘束度マトリクスは、堤体形状がフィレットなしの基本三角形断面(下流面勾配1:0.8)で高さ方向に24等分割したモデルを使用した(コンクリートの弾性係数 E_c 、岩盤の弾性係数 E_R 、 $E_c/E_R=6$)。ダムモデルの層分割図を図-2、計算に用いた拘束度マトリクスを表-3に示す。

なお、計算に用いるマトリクス各層の最終温度降下量

(ΔT)は、温度履歴計算より得られた温度降下量分布のマトリクス各層内平均値を用いた。

拘束温度ひずみ計算ケースは、温度履歴計算の全計算ケース(20ケース)に対して、それぞれダム高で3パターン(ダム高48m(24層×2m)、72m(24層×3m)、144m(24層×6m)の合計60ケースとした。

(2) 検討結果

a) 基本ケース(標準パターン)

各リフトのコンクリート温度は図からわかるように、セメントの水和反応による内部発熱により打設後上昇を続け、2~3日後に1次ピーク温度(ϕ_1)に達する。その後、外気への熱伝達により温度は徐々に降下(ϕ_2)し、次リフト打設後に再び上昇していく。図-3に基本ケースにおける各月打設リフトの温度履歴を示すが、7~9月の夏期打設リフトのコンクリート温度は打設後20日前後で最高上昇温度を迎え、その後は緩やかに降下していく。一方、1~3月の冬季打設リフトのコンクリート温度は、打設後100日経過しても徐々にではあるが上昇を続ける。これは、冬季打設リフトの打設温度が低いため、打設後長期にわたって上下リフトの温度の熱伝導を受け、温度上昇を続けるためと考えられる。各月打設リフトの最高上昇温度をみると、8月打設リフトの最高上昇温度が最大となり、打設温度が高いほど最高上昇温度は高くなる傾向を示す。

基本ケースの解析条件に従って、ダム堤体内の拘束温度ひずみ分布を求めた結果を図-4に示す。各リフトの最高上昇温度から算定された拘束温度ひずみは、ダムの規模により異なるが、温度上昇が最大となる夏期打設リ

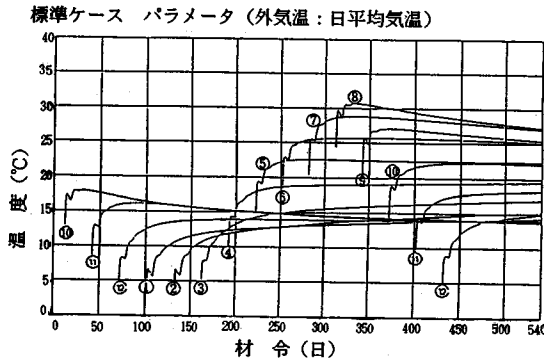


図-3 各月打設リフトの温度履歴

フト周辺の標高部（以降、最大温度降下量区間と呼ぶ）あるいは岩盤による拘束が大きい岩着部で最大値をとり堤体上部へいくほど収斂する傾向を示す。

b) 外気温の影響

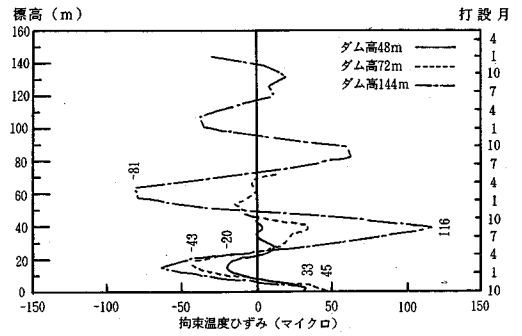
外気温が拘束温度ひずみに与える影響を検討するために、外気温の与え方は、基本ケース（図-5の——で示す）に対して、一律4℃低下させた場合（図-5の----）と、外気温を日平均気温に対して25%変動させた場合（図-5の.....）の比較を行った。この解析結果を図-6に示す。外気温が拘束温度ひずみに与える影響は小さく、外気温をコンクリート打設温度より一律4℃低下させても、拘束温度ひずみの変化はほとんどない。これは、外気温が一律に変動した場合、最高上昇温度も一律に変動し、各リフト間での温度勾配（ここでは鉛直方向に位置する、各リフトの平均温度降下量の差の単位距離当りの割合をいう。従って、温度勾配が小さい程、各リフトの相互拘束は小さくなる）が、維持されるためである。また外気温の振幅を一定比率変動させた場合、拘束温度ひずみはこの変動させた比率に近い割合で変動した。これは寒暖の差が大きくなるとそれに伴って、コンクリートの最終温度降下量が大きくなるためである。

これらの外気温と最大拘束温度ひずみのパラメータ解析から判断すると、この検討結果は我が国で建設されるダムの一般的傾向を示していると考えられる。

c) 配合（単位セメント量）の影響

コンクリートの配合、特に単位結合材量が拘束温度ひずみに与える影響を検討するために、基本ケースに対して、単位結合材量を $C+F=120, 140, 180 \text{ kgf/m}^3$ ($F/C+F=30\%$) と変化させた場合の検討結果を図-7に示す。

2. 研究の目的 でも述べているように、本論文で取り扱っている温度応力の長期問題に限って言えば、配合（単位セメント量）を変動させた場合も拘束温度ひずみ



(圧縮)

(引張)

図-4 拘束温度ひずみ分布（基本ケース）

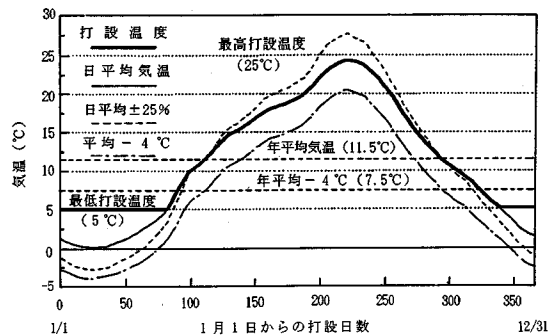


図-5 外気温と打設温度

はほとんど変化しなかった。これは単位セメント量が増加することにより最高上昇温度も高くなるが、打上がり速度が一定で規則的に堤体が打上がることから各標高での温度上昇量が一律であり、単位セメント量が変化しても堤体内の温度勾配が変化しないためと考えられる。

d) 打設開始日の影響

打設開始が拘束温度ひずみに与える影響をみるため基本ケースの10月打設開始に対して、打設開始時期を1月、4月、7月とした場合の比較を行った。岩着リフトの打設開始日をパラメータとした解析結果を図-8に示す。打設開始時期は拘束温度ひずみに大きな影響を与え、打設開始を7月とした場合に最大拘束温度ひずみが岩着部付近で生じる。これは、拘束度の大きくなる岩着部付近で、最大温度が発生しているためと考えられる。

なお、10月の打設開始は、夏期を過ぎた打設であり最大温度降下量区間の標高が最も高くなって拘束温度ひずみの低減を期待でき、しかも、冬期を迎えて岩着部の温度降下量が小さくなることから、最大温度降下量区間、岩着部ともに拘束温度ひずみの点から有利になる打設開始時期であると考えられる。

e) 打上がり速度の影響

堤体の打上がり速度が拘束温度ひずみに与える影響を

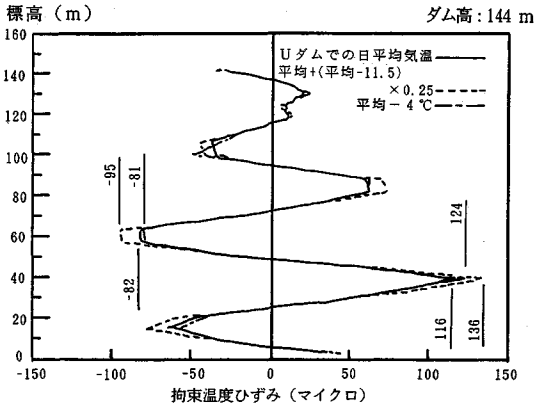


図-6 拘束温度ひずみに与える外気温の影響

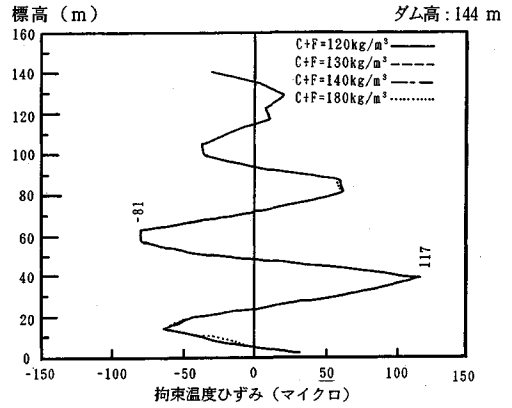


図-7 拘束温度ひずみに与える配合の影響

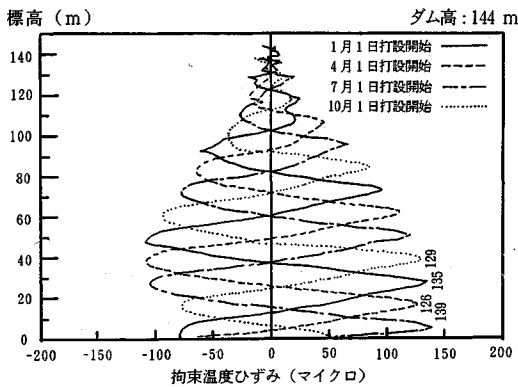


図-8 拘束温度ひずみに与える打設開始日の影響

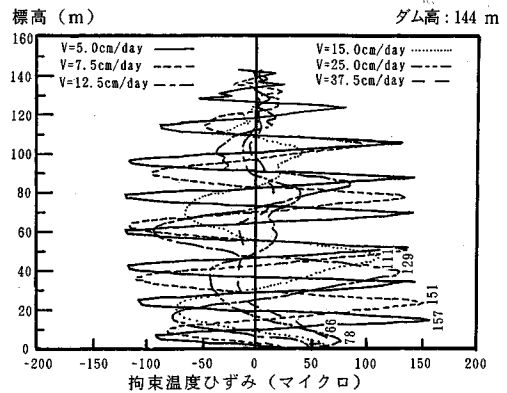


図-9 拘束温度ひずみに与える打上り速度の影響

検討するため、基本ケースに対して、他の条件は同一として①リフト厚を0.5m, 1.0m, 1.25m, 1.5mに変更する場合、②打設間隔を2日, 3日, 5日, 10日, 15日に変更する場合、③リフト厚と打設間隔を同時に変更する場合(打上り速度25cm/day)の比較を行った。

打上り速度 V は、リフト厚 (l) と打設間隔 (D) から $V=l/D$ と表されるが、打上り速度一定の場合、リフト厚を変動させても拘束温度ひずみに大きな影響を与えない。この傾向は、打設間隔についても同様であり、拘束温度ひずみを決定する主要因はリフト厚や打設間隔そのものではなく、堤体の打上り速度であるといえる。

この解析結果を図-9に示す。図によれば、拘束温度ひずみが最大値をとる部分は打上り速度が遅い場合には最大温度降下量区間となり、打上り速度が速い場合には岩着部となる。

(3) まとめ

以上のパラメータ解析の結果により、温度規制上着目すべき引張側の最大拘束温度ひずみの発生位置は、最大

温度降下量区間と岩着部であることおよび最大拘束温度ひずみに大きな影響を与えるパラメータとしてダム高と打上り速度があげられることが明らかとなった。この結果をとりまとめて図-10, 11に示す。図では最大温度降下量区間および岩着部のそれぞれについて、発生する引張側の最大拘束温度ひずみをプロットしている。図によれば、最大温度降下量区間においては打上り速度が遅いほど、またダム高が高くなるほど拘束温度ひずみは大きくなる傾向を示す。一方、岩着部においては、打上り速度が遅いとリフトの熱放散により温度上昇が抑えられて拘束温度ひずみは小さくなり、打上り速度が速いと堤体内の温度勾配が小さくなって拘束温度ひずみが小さくなることから、極大値をとるような打上り速度が存在する。この極大値は、ダム高によって異なるが、最大温度降下量区間に見られるような打上り速度と拘束温度ひずみの明瞭な関係は、岩着部では見られない。

(4) 考察

a) 相対打上り速度

前述のとおり、拘束温度ひずみに大きな影響を与える

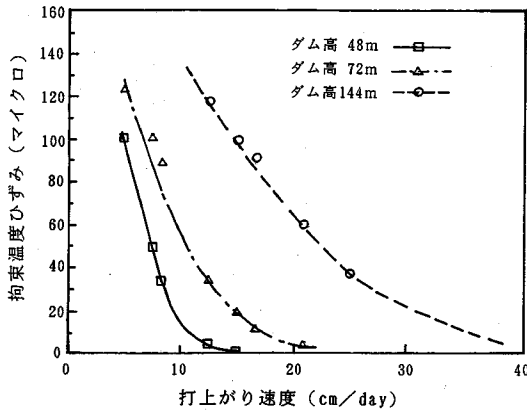


図-10 打上がり速度と拘束温度ひずみの関係 (最大温度降下量区間)

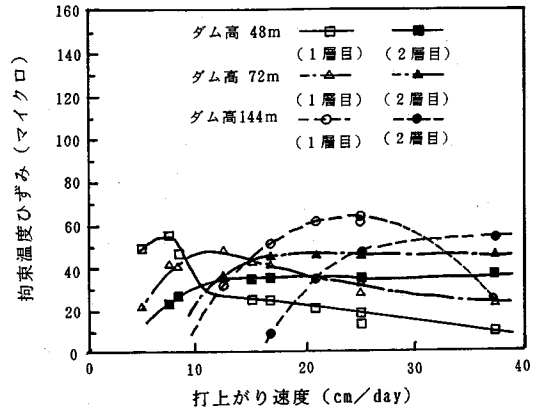


図-11 打上がり速度と拘束温度ひずみの関係 (岩着部)

主要因としては、打上がり速度 (V) とダム高 (H) があげられる。ここで、先にも述べたように『拘束度マトリクスを用いる方法』が、幾何学的相似とともに力学的相似も成立することを考えると、打上がり速度をダム高で規格化し、相対打上がり速度 (V/H) の概念を導入することで、ダム規模の影響を排除することが可能となる。そこで以下では、相対打上がり速度の概念を用いての考察を試みる。なお、以下の記述では、便宜上相対打上がり速度 (V (m/day)/ H (m) = V_H (1/day)) は、すべて10,000倍した値で示すものとする。

b) 最大拘束温度ひずみ発生部

検討結果でも述べたように、堤体内で拘束温度ひずみが最大となるのは、夏期打設リフト周辺の標高部 (最大温度降下量区間) あるいは岩着部である。従って、面状工法で施工するダムの温度規制計画を検討する場合、この両者の拘束温度ひずみを比較すれば、より最適な打設計画を得ることができる。

図-12は、最大温度降下量区間の拘束温度ひずみについて、横軸に相対打上がり速度、縦軸に拘束温度ひずみとして示したものである。図-12に示すように、最大温度降下量区間の拘束温度ひずみと相対打上がり速度の関係は、ダム高によらず1つの曲線上に位置し、ダム高の影響を排除できる。これは相対打上がり速度を一定とした場合、ダム高が小さければ拘束度に影響を与える最大温度降下量区間 (H) およびレイヤー長 (L) は相対的に小さくなり、逆にダム高が大きくなれば相対的に大きくなって、これらの比 H/L が維持されるためである。図によれば、最大温度降下量区間の拘束温度ひずみは相対打上がり速度を速くすることによって急激に減少し、温度規制上有利であることがわかる。最大温度降下量区間の拘束温度ひずみを 100×10^{-6} 以内に抑えるためには、相対打上がり速度 $V_H = 10$ 、即ち堤高50m, 100m, 150m

のダム規模に対して、それぞれ5cm/day, 10cm/day, 15cm/day以上の打上がり速度を確保すればよいことになる。

次に、岩着部の拘束温度ひずみ (拘束度マトリクスの1層目, 2層目) と相対打上がり速度の関係は、図-11に示すように、拘束温度ひずみは相対打上がり速度が遅い場合には1層目が大きく、速い場合には2層目が大きな値を示し、相対打上がり速度が20~25付近で1層目の値と2層目の値が逆転する。また、拘束温度ひずみの極大値は相対打上がり速度15付近の1層目で発生し、相対打上がり速度が25以上では拘束温度ひずみはほぼ一定となる。このように岩着部における相対打上がり速度と拘束温度ひずみの関係は、最大温度降下量区間ほど明瞭ではないが、これは岩着部のひずみが外部拘束を伴うものであり、温度勾配のみならず温度降下量自体が、拘束温度ひずみに対する大きな影響要因となっているためである。従って、岩着部では打上がり速度を速くしても温度規制上の効果は少ない。むしろ、従前より行われていたハーフリフトの採用等によるリフトの熱放散を期待した温度降下量の低減がより有効であると考えられる。なお、2層目の拘束温度ひずみはダム規模が大きくなるほど大きな値を示すが、ダム高144mでも 60×10^{-6} 以内の値であり、長期的な温度応力に関しては問題は少ない。

c) 面状工法における最適打上がり速度

図-12から最大温度降下量区間と岩着部における拘束温度ひずみをそれぞれ比較すると、岩着部のひずみのうち1層目と2層目を包絡するものとして与えている。図によれば、相対打上がり速度が15程度以下では最大温度降下量区間の拘束温度ひずみが卓越し、15程度以上では岩着部の拘束温度ひずみが卓越する。また、岩着部の拘束温度ひずみは、相対打上がり速度が25程度以上

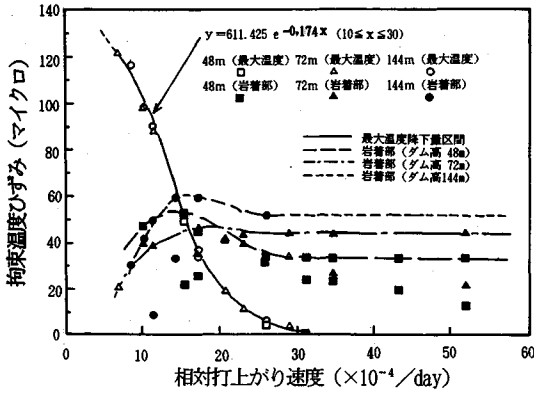


図-12 相対打上がり速度と拘束温度ひずみ (最大温度降下量区間と岩着部)

ではひずみがほぼ一定値に近づく。これらのことから、10月打設開始の条件で温度応力の長期問題を考えた場合、ダム規模に関係なく相対打上がり速度を15程度以上とすることが望ましく、特に相対打上がり速度を25程度以上とした場合に拘束温度ひずみは最小値を示すが、これ以上速くしても温度規制上のメリットは少ない。

以上の結果から、ダム高と打上がり速度の関係について実際の施工に便利なよう概略とりまとめたものが図-13である。図では、相対打上がり速度15および25については太線で、最大温度降下量区間に発生する拘束温度ひずみ 120×10^{-6} , 100×10^{-6} , 80×10^{-6} , 60×10^{-6} については細線で示している。また、図の下には打上がり速度に対応するリフト厚75cm, 100cm, 150cmの打設間隔をそれぞれ示している。図によれば、ダム高100mのダムでは相対打上がり速度15以上とするためには、打上がり速度を15cm/dayとすることが必要であり、これは、リフト厚75cmで打設する場合5日以内、100cmの場合6日以内、150cmの場合10日以内の打設間隔が必要であることを示している。図からも明らかなようにダム規模が大きくなれば、相対打上がり速度15あるいは拘束温度ひずみ 100×10^{-6} をクリアするために、リフト厚を厚くするか、打設間隔の短縮を図り、打上がり速度を速くすることが肝要である。なお、例えば10cm/dayの打上がり速度の場合、相対打上がり速度は堤高100mのダムで10、50mのダムで20となるので前者は最大温度降下量区間が、後者は岩着部がそれぞれクリティカルとなり、堤高の高いダムほど打上がり速度を速くすることによる温度規制上の効果は著しい。

5. 結論

本論文では、まずコンクリートダムの温度規制の特徴について柱状工法と面状工法とを比較して概略記述し、

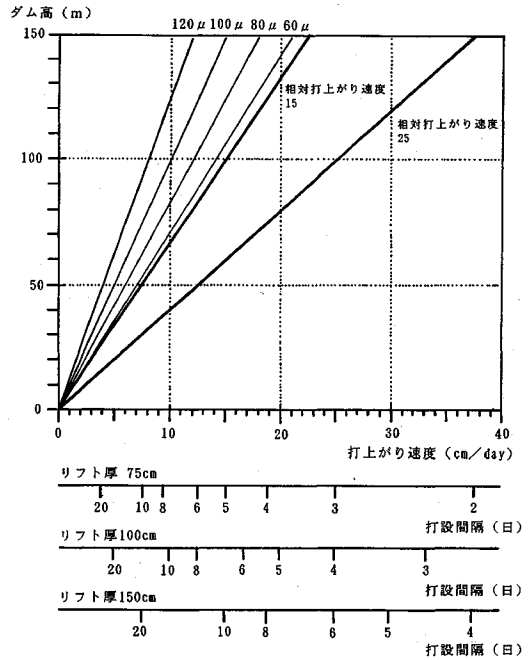


図-13 ダム高と打上がり速度

次に、コンクリート内に発生する温度応力の発生機構について詳述した上で、最後に面状工法における温度応力を長期問題の面から検討した最適打上がり速度についての一考察を述べた。その検討結果をまとめると次のようになる。

- (1) 面状工法における温度規制の長期問題において堤体の打上がり速度は、ダム堤体内に発生する拘束温度ひずみに大きな影響を与える。
- (2) 打上がり速度をダム高で規格化した相対打上がり速度を用いれば、最大温度降下量区間の拘束温度ひずみは、ほぼ一つの曲線で表すことができ相対打上がり速度が速いほど拘束温度ひずみを小さく抑えることができる。
- (3) 岩着部の拘束温度ひずみと相対打上がり速度との関係は、最大温度降下量区間の場合ほど明瞭ではなく、相対打上がり速度を速くしても拘束温度ひずみを抑える効果は小さい。
- (4) 最大温度降下量区間および岩着部の拘束温度ひずみとの関係は、相対打上がり速度が15よりも遅い場合には前者が、速い場合には後者が卓越する。従って、最大温度降下量区間の拘束温度ひずみを小さく抑えるために相対打上がり速度はなるべく速くするのが望ましいが15以上では岩着部の拘束温度ひずみが支配的となり、これ以上速くしても温度規制上の効果は小さい。
- (5) 以上の結果から、我が国の一般的な外気温の条件

のもとで、単位セメント量 $C+F=130\text{kgf/m}^3$ ($F/C+F=30\%$) 程度の配合のコンクリートを使用して、面状工法で施工する堤高 150m 級の大規模ダムでは、打設間隔を短くするかあるいはリフト厚を厚くして、速い相対打上がり速度 15 程度を維持することが温度規制上有利になることがわかった。

6. おわりに

今回は、幾何学的に相似な 3 つのモデルダム〔ダム高 (48m, 72m, 144m)〕を用いて、相対打上がり速度という概念を導入して、コンクリートダムの温度規制の長期問題に関して、解析的検討を行った。また現在、実際に温度応力上着目される長大レヤー (約 170m) が出現する大規模ダムを施工中である。今後は、今回の解析結果の妥当性をこの実ダムのモデルで検証した上で、後発のコンクリートダムの温度規制計画および施工計画に反映させていきたいと考える。

参 考 文 献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書，ダム編，昭和 61 年制定，1986.
- 2) 山住有巧：コンクリートダムの面状工法と洪水吐に関する研究，1993.
- 3) 建設省河川局開発課・(財)ダム技術センター：改訂コンクリートダムの細部技術，1992 年 3 月.
- 4) 永山 功・矢沢克敏：コンクリートダムの温度応力解析 (I) (II)，土木技術資料，Vol. 22-7, 9, 1980.

- 5) 大藪勝美・永山 功・小林政登：RCD 工法によるコンクリートダムの温度規制，土木技術資料，Vol.29-11, 12, 1987.
- 6) 瀬古育二・原 稔明・自閑茂治：温度応力に関する実測解析，ダム技術，No. 28, 1989.
- 7) 加藤剛四郎・佐々木和実：リフトスケジュール作成についての一考察，水資源開発公団第 22 回技術研究発表会資料，1988.
- 8) 水資源開発公団：コンクリートダムの合理化施工について，水資源開発公団第 24 回技術研究発表会パネルディスカッション資料，1990.
- 9) 山口温朗・自閑茂治・加藤宏基：コンクリートダムの温度規制計画，水資源開発公団試験所構造材料試験室報告，第 8708 号，1988.
- 10) 水資源開発公団比奈知ダム建設所検討資料：比奈知ダム本体実施設計業務，1990.
- 11) 水資源開発公団・国土開発技術研究センター：昭和 58 年度ダム合理化施工検討業務，1984.
- 12) ACI Committee 207: Effect of Restraint, Volume Change and Reinforcement on Cracking of Massive Concrete Practice, 1983.
- 13) ACI Committee 207: Mass Concrete and Other Massive Structure, ACI Manual of Concrete Practice, 1983.
- 14) U. S. Bureau of Reclamation: Cooling of Concrete Dams, Boulder Canyon Project Final Reports, Part 7, Bulletin 3, 1949.
- 15) U. S. Bureau of Reclamation: Design of Gravity Dams, 1976.
- 16) Roy R. Clark: Mass Concrete Control in Detroit Dam, ACI Journal No. 6, 1957.

(1993.6.24 受付)

A STUDY OF THERMAL CONTROL ON CONCRETE GRAVITY DAM CONSTRUCTED BY PLANE PLACED CONCRETE METHOD

Ariyoshi YAMAZUMI, Kazuo HARITA, Shigeharu JIKAN and Tsuyoshi TANI

It is considered that concrete gravity dams constructed by the rationalized construction methods such as the RCD method or the ELCM (Extended Layer Construction Method) are more advantageous to thermal stress than the conventional construction method, for the concrete has a little content of cement and is placed rapidly and continuously. With regard that, the authors carried out thermal stress analysis by the Restraint Matrix Method in order to study on thermal strain in the dam body. As a result, the proposal for placing speed in the rationalized construction method is to be attempted introducing the relative placing speed which is placing speed divided by dam height.